

降雨景観のための高速な雨の軌跡の描画法

吉田 有希 土橋 宜典 山本 強

北海道大学大学院情報科学研究科

CGを用いて雨天時の景観画像を生成するための重要な要素として雨滴の軌跡の表示が挙げられる。従来手法では、個々の雨滴をパーティクルによって表現し、その軌跡の表示が行われている。しかし、大量の雨滴の軌跡が存在する場合には、計算コストが高く、高速に表示することは難しい。そこで、本研究では、前処理において複数の雨滴の軌跡の画像を作成しておくことで、高速に降雨シーンの画像を生成する手法を提案する。

A Fast Rendering Method of Raindrop Streaks for Rainy Scenes

Yuki YOSHIDA Yoshinori DOBASHI Tsuyoshi YAMAMOTO

Graduate School Information Science and Technology, Hokkaido University

One of the important factors for creating synthetic images of a rainy scene by using computer graphics is raindrop streaks. Previously, the raindrop streaks are rendered by using a particle system. That is, raindrops are represented by particles and the raindrop streaks are rendered by drawing streaks of the particles. However, the number of the raindrops is about 100,000 in general. Therefore, rendering the streaks of all particles is computationally very expensive. This indicates that the rendering of the rainy scene in real-time is difficult by using the previous approach. To address this problem, this paper proposes a fast rendering method for raindrop streaks. In the proposed method, a set of textures for streaks of a certain number of raindrops are prepared in a preprocess. Then the raindrop streaks are rendered in real-time by mapping the texture onto transparent quadrilaterals and drawing them as billboards.

1. はじめに

近年、3次元コンピュータグラフィックスを用いて雲、水、炎などさまざまな自然現象を表現するための研究が数多く行われている。このとき、晴天時や曇天時だけでなく悪天候時のシミュレーションも重要な課題である。悪天候時の景観画像を生成するための要素として、例えば、暴風、降雨、砂埃、稲妻などが挙げられる。本研究では、これらのうち降雨に着目する。降雨景観の表現に関する研究として、乗用車のフロントガラスを流れる雨滴の表現が提案されている[1][2][3][4]。これらの手法により、乗用車内部から見た場合の降雨現象をリアルに表現することが可能である。しかし、降雨景観の表現における重要な要素として、雨滴の落下軌跡の表現が挙げられる[5][6][7][8][9]。しかし、これらの手法によってリアルな降雨景観画像を生成するためには、大量の雨滴の軌跡を一つ一つ描画する必要があり、極めて計算コストが高い。そのため、ゲームやバーチャルリアリティ、フ

ライトシミュレータなどリアルタイム性が要求されるアプリケーションへの応用は難しい。

本稿では、上記の問題を解決し、降雨による雨滴の落下軌跡を高速に描画する手法を提案する。雨滴の落下軌跡を描画する単純な手法として、個々の雨滴をパーティクルとして表現し、それぞれのパーティクルの軌跡を描画することが考えられる。しかし、雨滴の個数は、視野内のみに限定した場合でも、約十数万個存在する。そのため、個々のパーティクルについて軌跡を描画することは計算コストが高くリアルタイム化は難しい。そこで、本研究では、まず前処理において比較的狭い一定の空間内(本稿では、 1m^3 とした)に存在する複数の雨滴の軌跡を描画しておき、テクスチャとして保存しておく。以下、これを雨滴テクスチャと呼ぶ。そして、リアルタイム処理においては、個々の雨滴を描画する代わりに、ビルボードと呼ばれる仮想平面に前処理で生成しておいた雨滴テクスチャをマッピングして描画することで効率的に雨滴の軌跡を表示する。このとき、スポットライトなどの点光

源による照明効果についても考慮する。また、更なる高速化を達成するため、視点からの距離や光源からの距離に応じて描画するビルボードの個数を制限する。提案手法を用いて降雨景観画像を生成し、その有効性について検討する。

本論の構成は、以下のとおりである。まず、2節において、降雨景観の表現に関する従来法について議論する。次に、3節において、提案手法の基本的考え方について述べる。4節では、前処理である雨滴テクスチャの生成法について述べる。5節では、雨滴テクスチャを用いてリアルタイムに雨滴の軌跡を描画する手法について述べる。そして、6節において、提案手法を用いた適用例について示し、手法の妥当性について検討する。最後に、7節において本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 従来研究

降雨景観の表現に関する手法として、金田らは乗用車のフロントガラス上を流れる雨滴の画像を生成する手法が提案されている[1]。この研究では、フロントガラス上での雨滴の動きや環境マッピングを利用した雨滴のレンダリング法が提案している。また、この手法を拡張し、ワイパーによって雨滴が跳ね返される効果を考慮した手法も提案されている[2]。しかし、これらの手法では、画像生成にレイトレーシング法を用いており、リアルタイムに画像を生成することは実現されていない。そこで、佐藤らはグラフィックスハードウェアを利用してリアルタイムに画像を生成できる手法を提案している[3]。また、これらの手法では、雨滴の形状は球と過程されていたため、メタボールを利用して雨滴の複雑な形状変形も表現できる手法も提案されている[4]。これらの手法により、フロントガラスなど物体表面上を流れる雨滴については、リアルな画像を生成することが可能となっている。しかし、降雨景観の生成においては物体表面を流れる雨滴だけでなく、空間中を落下する雨滴の表現も重要となる。

雨滴の落下を表現するための単純なアプローチとして、2次元の合成による方法が考えられる。Starikらは、視野内に存在する雨滴の落下軌跡を描画した画像を生成し、背景画像と合成することで降雨景観画像を生成する手法を提案している[5]。しかし、この方法は、降雨画像と背景画像の合成表示であるため、任意の視点からの画像は生成できず、また、奥行き感を表現することも難しい。Gargらは、視点位置および光源位置をさまざまに変化させた場合の単一の雨滴の落下軌跡の画像をデータベースとして作成しておくことで降雨景

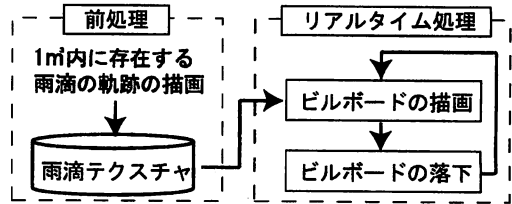


図1 提案手法の処理の流れ

観画像を生成する手法を提案している[6]。画像生成においては、3次元空間内に発生させたパーティクルの位置および視点位置、光源位置を基に、データベースから対応する画像を抽出してパーティクル位置にマッピングして描画する。これにより極めてリアルな画像を生成できる。しかし、3次元空間内に存在する全ての雨滴についてこの処理を行うことは計算コストが高く、リアルタイムでの描画は難しい。また、この手法も背景として2次元画像を利用しているため、任意の視点からの画像生成は困難である。山本らは雨滴の輝度を天空光の影響まで考慮して決定して落下軌跡を描画する手法を提案している[7]。また、この手法を拡張し、風の影響まで考慮した手法も提案されている[8]。これらの手法では、全ての物体は3次元で定義されており、任意の視点位置からの画像を生成できる。しかし、大量の雨滴の軌跡を個々に描画しているため、計算コストが高く、リアルタイムでの表示は難しい。Rousseauらは屈折によって雨滴を通して見える様子まで考慮して軌跡を描画する手法を提案している[9]。この方法では、グラフィックスハードウェアを利用することでリアルタイムに画像を生成することができる。しかし、個々の雨滴の描画コストが高く、雨滴の個数は10,000~20,000個程度にとどまっている。

そこで、本研究では、比較的狭い空間中(本稿では、 1m^3 中)に存在する複数の雨滴の軌跡を描画した画像をテクスチャとして保存しておくことで高速に雨滴の軌跡を描画する手法を提案する。

3. 提案手法の基本的考え方

図1に示すように、提案手法は大きく前処理と毎フレーム処理の2つに分けられる。以下、それぞれの処理について基本的考え方を述べる。

まず前処理においては、 1m^3 の空間中に存在する雨滴の軌跡を描画したテクスチャを生成する。これを雨滴テクスチャと呼ぶ。ただし、ある降雨強度において、 1m^3 の空間中には、さまざまな粒径の雨滴が存在する。また、各粒径ごとの雨滴の個数も降雨強度に応じて変化する。さらに、雨滴の落下速度は雨滴の

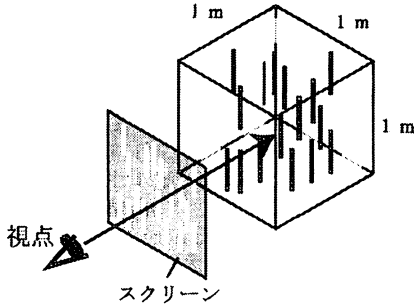


図3: 雨滴テクスチャの生成

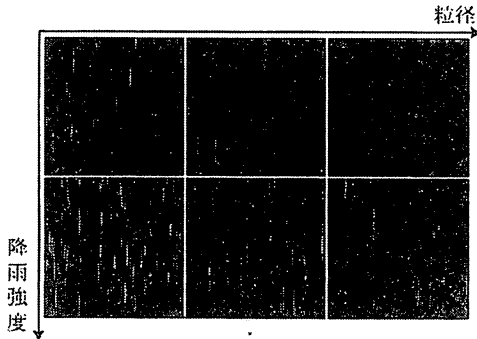


図4 雨滴テクスチャの例

粒径ごとに变化する。したがって、 1m^3 の空間中内の雨滴の落下軌跡は降雨強度と粒径に応じて異なったものとなる。そこで、降雨強度および粒径に応じた複数の雨滴テクスチャを生成する。すなわち、降雨強度および粒径に応じた 1m^3 の空間中に存在する雨滴の個数を算出し、雨滴が1フレーム分に移動する距離に応じた軌跡を描画する。本稿では、アニメーションのフレームレートは30fpsを仮定し、1/30秒の間に雨滴が移動した場合の軌跡を描画した。このとき、雨滴の軌跡は線分として描画する。得られた画像を雨滴テクスチャとして保存しておく。

次に、毎フレーム処理では、雨滴テクスチャを利用して高速に雨滴の軌跡を描画する。個々の雨滴を描画する代わりに、ビルボードと呼ばれる四角形を描画することで高速化を図る。まず、シミュレーション空間内にビルボードを一定間隔で配置する。そして、前処理で作成しておいた雨滴テクスチャをマッピングしてビルボードを描画することで雨滴の軌跡を描画する。このとき、ビルボードにマッピングするテクスチャは指定された降雨強度に応じて選択する。そして、ビルボードを落下させることで雨滴が落下する様子のアニメーション表示を行う。提案手法では、降雨

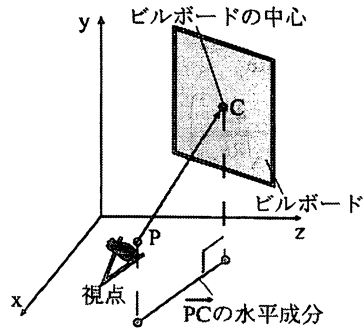


図5 ビルボードの回転

強度に応じた複数の雨滴テクスチャを生成しているため、降雨強度が時間的に変化した場合でもリアルタイムに軌跡の描画を行うことが可能である。

以下、4節および5節において、前処理とリアルタイム処理について、それぞれ詳しく説明する。

4. 雨滴テクスチャの生成(前処理)

図3に示すような 1m^3 の立方体を考える。そして、注視点は立方体の中心とし、また、雨滴の落下方向および立方体の一つの側面に対して視線が垂直になるように視点を配置する。そして、平行投影を仮定し、この立方体内に存在する雨滴が1/30秒間に移動した場合の軌跡を線分として描画することで雨滴テクスチャを生成する。ただし、前述したように、雨滴テクスチャは降雨強度 R および粒径 D ごとに生成する。そのため、降雨強度に応じた粒径ごとの雨滴 $n(R, D)$ の個数と粒径に応じた落下速度 $v_i(D)$ を求める必要がある。降雨強度 R における 1m^3 中に存在する粒径 D の雨滴の個数は Marshall-Palmer 分布を用いて次式により計算することができる[10]。

$$n(R, D) = 8000 \exp(-4.1R^{-0.21}D) \quad (1)$$

次に、雨滴の落下速度 $v_i(RD)$ は以下の方法により算出する。雨滴は粒径に応じた一定の終端速度で落下しているものとする。粒径に応じた雨滴の落下速度は Stokes の抵抗法則を用いて、以下の式に計算することができる[11]。

$$v_i(D) = \left(\frac{4gD(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_R} \right)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 g は重力加速度、 ρ_p は雨滴の密度、 ρ_f は大気密度である。また、 C_R は次式により与えられる。

$$C_R = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & (Re_p < 1.0) \\ \left(0.55 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_p}}\right)^2 & (1.0 \leq Re_p < 10^4) \end{cases} \quad (3)$$

$$Re_p = \frac{v_i(D)\rho_f D}{\mu} \quad (4)$$

ここで、 μ は大気粘性係数を表す。なお、式(2)により落下速度を求めるためには、式(3)および式(4)を計算する必要があるが、式(4)に落下速度が含まれている。そのため、適切な初期値から始めて繰り返し式(2)から式(4)を計算して $v_i(D)$ を更新し、収束した値を落下速度として用いる。

以上により得られた雨滴の個数と速度より、30分の1秒間に移動する軌跡を線分として描画する。ただし、描画する線分の輝度値は雨滴の不透明度を表すものとし、雨滴の粒径を D 、1フレームの移動量を $v_i(R, D)/30.0$ mとした場合に $2D/v_i(R, D)$ で与えられる[5]。また、同一の箇所に複数の雨滴が描画された場合は、混合処理により行うことで軌跡の重なりを表現する。

以上の処理を全ての降雨強度および粒径に応じて行うことで雨滴テクスチャの生成を行う。提案手法では、降雨強度 R および粒径 D に関して一定間隔で離散化して雨滴テクスチャを生成した。図4に雨滴テクスチャの例を示す。以降、降雨強度 R_i ($i = 1, 2, \dots, n_R$)および粒径 D_j ($j = 1, 2, \dots, n_D$)に対応する雨滴テクスチャを $T(R_i, D_j)$ で表す。

5. 雨滴の軌跡の描画(毎フレーム処理)

毎フレーム処理では、雨滴テクスチャをマッピングしたビルボードの描画と移動を繰り返し行うことで、雨滴の軌跡のアニメーション表示を行う。また、ビルボードに照光処理を施すことで、光源によって雨滴の落下軌跡の明るさが変化する照明効果を擬似的に表現する。このとき、光源から到達する光の強度が小さい領域については、ビルボードを描画しないことで高速化を図る。以下、ビルボードの描画処理と照明効果の計算方法について詳しく述べる。

5.1 ビルボードの描画

降雨強度 R_i での雨滴の軌跡を描画する場合を考える。まず、降雨領域を設定する。提案手法では、降雨領域として、ユーザが指定した視点から一定の距離の範囲内を設定する。これは、視点から遠方の領域については、個々の雨滴の軌跡が認識されることはほとんどないと考えられるためである。視点から遠

方の領域については、単に背景の輝度を視点からの距離に応じて減衰させて表示する。次に、初期状態において、降雨領域として設定した空間内にビルボードを複数生成する。この処理は以下のように行う。まず、降雨領域を一边が1mのボクセルに分割する。そして、各ボクセル位置に n_D 個のビルボードを生成する。各ボクセルに配置した n_D 個のビルボードには、それぞれ、異なる粒径 D_j ($j = 1, 2, \dots, n_D$)に対応する雨滴テクスチャ $T(R_i, D_j)$ をマッピングする。これにより、ビルボードを用いて描画された粒径ごとの雨滴数の比率は、式(1)により計算される雨滴数 $n(R, D)$ の比率と同一になる。

ビルボードを描画する際には、ビルボードの面が視点からビルボードの中心へ向かうベクトルの水平成分に垂直になるように回転して描画する(図5参照)。ただし、ビルボードは視点から遠い順に並べ替えておき、ビルボードにマッピングされている雨滴テクスチャの輝度値を透明度とした混合処理を施しながら描画する。これにより、奥行きによる雨滴の軌跡の輝度の変化を表現することができる。全てのビルボードを描画した後は、各ビルボードに割り付けられている粒径から計算される落下速度に応じた距離だけ移動させる。ただし、地面に到達したビルボードについては、その位置を降雨領域上端へ変更する。

以上の処理を繰り返すことにより、雨滴の軌跡の描画を行う。

5.2 照明効果を考慮した高速化

ビルボードへの照光処理を施すことによって、光源によって雨滴の輝度値が変化する効果を擬似的に表現する。ただし、本稿では、光源が物体によって遮蔽される効果については考慮しない。ビルボードの照光処理については、平行光源および点光源を仮定し、標準的なグラフィックスライブラリであるOpenGLの機能を用いて計算した。

点光源などの場合には、光源からビルボードの距離の2乗に比例して、照度は減衰する。そのため、光源からほとんど光が届かない領域に発生させたビルボードについては視覚的にほとんど知覚されない。そこで、そのようなビルボードについては描画しないことで高速化を図る。

6. 実装結果

提案手法を用いて降雨景観画像を生成し、実験を行った。なお、実験に用いた計算機の実環境は、CPUがPentium4 3GHz、また、グラフィックスハードウェアとしてGeforce7900GTXを搭載したPCを用いた。降雨強度 R として1.0, 5.0, 10.0, 20.0 mm/hの4種類を想定し、また、雨滴の粒径として

1.00, 1.20, 1.40, 1.60, 1.80, 2.00 mm の 6 種類を想定し, 合計 24 枚の雨滴テクスチャを生成した. 雨滴テクスチャの画像サイズは 512x512 であり, 記憶容量は 6.29MB であった. また, 雨滴テクスチャの生成に要した時間は 1.64 秒であった. 降雨領域として視点から距離 5m の空間を設定した. 図 5 および図 6 に提案手法によって生成した画像の例を示す.

図 5 は降雨中を走行する自動車のヘッドライトによって照射された雨滴の軌跡を描画した例である. 図 5(a) および (b) は異なる視点から見た画像である. ヘッドライトによる光の照射領域に沿って雨滴の軌跡が表示されているのがわかる.

次に, 図 6 では, 街頭によって照射された雨滴の軌跡を描画した例である. 図 6(a) は遠方から見た画像, また, 図 6(b) は光源付近に視点位置を配置した画像である. これらの図から, 光源の近傍と遠方での雨滴の軌跡の輝度変化が表現されている.

図 5 および図 6 を生成するために要した計算時間は, いずれも 0.11 秒であった. 提案法を用いることによってほぼリアルタイムに画像を生成できている.

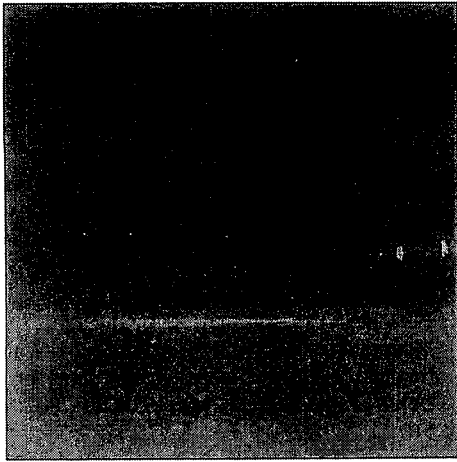
7. まとめと今後の課題

本稿では, 降雨景観における雨滴の軌跡のアニメーションをリアルタイムに表示する手法を提案した. 提案手法では, 前処理において, 1m³ の空間内に存在する雨滴の落下軌跡を生成しておき, 雨滴テクスチャとして保存しておく. 雨滴テクスチャは, 降雨強度および雨滴の粒径に応じて複数生成する. そして, リアルタイム処理において, ビルボードに雨滴テクスチャをマッピングして描画することで高速に雨滴の軌跡を描画する手法を提案した. また, ビルボードに照光処理を施すことで, 光源からの光により雨滴の輝度に変化する効果を擬似的に表現した. また, 光源からの光が弱い領域については, ビルボードの描画を行わないことで, さらなる高速化を達成した. 提案手法を用いて, 点光源に照射された雨滴の軌跡を描画した例に応用し, その有効性について確認した.

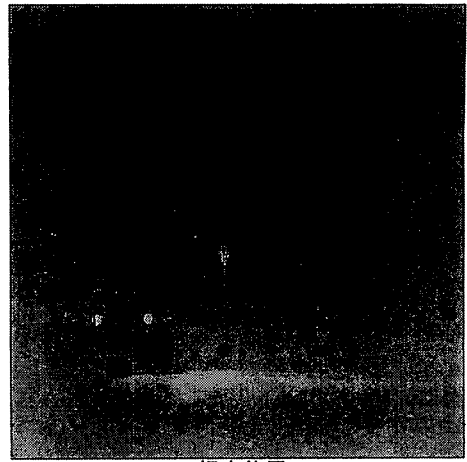
今後の課題として, 以下の事項が挙げられる. 描画速度はリアルタイム処理に用いるにはまだ不十分であるため, 今後の課題の一つとして, プログラマブルシェーダ等のグラフィックスハードウェアの機能を用いたさらなる高速化が挙げられる. また, 雨に濡れた質感や水しぶき等の現象や, 降雨空間中の光の減衰や散乱のモデルについても考慮する必要がある.

参考文献

- [1] K. Kaneda, T. Kagawa, H. Yamashita, "Animation of Water Droplets on a Glass Plate," Proc. Computer Animation'93, pp. 177-189 (1993).
- [2] K. Kaneda, S. Ikeda, H. Yamashita, "Animation of Water Droplets Moving Down a Surface," The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol. 10, No. 1, pp. 15-26 (1999).
- [3] T. Sato, Y. Dobashi, T. Yamamoto, "A Method for Real-time Rendering of Water Droplets Taking into Account Interactive Depth of Field Effects," Proc. IWEC 2002, pp. 110-117 (2002).
- [4] 五十住 拓哉, 田中 利光, 佐川 雄二, 杉江 昇, "ガラス面上を流れる水滴の形状変化の表現," 映像情報メディア学会誌 2006 年 4 月号.
- [5] S. Starik, M. Werman, "Simulation of Rain in Videos," Texture Workshop ICCV. 2002
- [6] K. Garg, S. K. Nayar, "Photorealistic Rendering of Rain Streaks," ACM Trans. on Graphics, Vol. 25, No. 3, Proc. SIGGRAPH 2006, pp 996 - 1002.
- [7] 山本 庸弘, 多々村 克己, "環境光強度を反映した降雨景観生成手法の開発," 情報処理学会研究報告(グラフィクスと CAD), 2004-CG-117, pp. 133-138 (2004).
- [8] 佐々木 克泰, 水上 嘉樹, 多々村 克己, "降雨の局所性を考慮した雨粒落下軌跡描画手法," 画像電子学会 Visual Computing/情報処理学会 グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2006 予稿集, pp. 71 - 76 (2006).
- [9] P. Rousseau, V. Jolivet, D. Ghazanfarpour, "Realistic Real-time Rain Rendering," Computers & Graphics, Vol. 30, No. 4, pp. 507 - 518 (2006).
- [10] Marshall, J.S. and W.M. Palmer : Distribution of Raindrops with size. J., Meteor. , Vol.5, pp.165-166, 1948
- [11] エリ・ランダウ, イエ・リフシッツ著, 竹内 均訳: 流体力学 1, 東京図書株式会社 (1891).

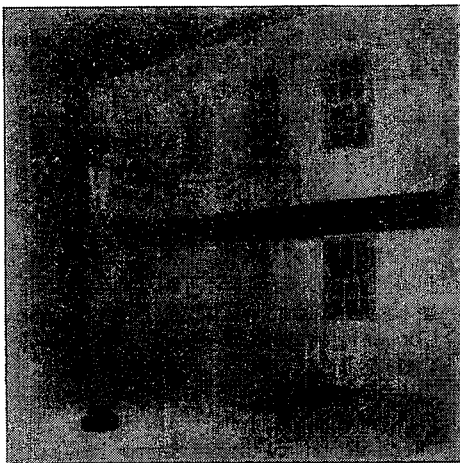


(a) 视点位置 1



(b) 视点位置 2

图 6 适用例 1



(a) 视点位置 1



(b) 视点位置 2

图 7 适用例 2